



21 Aktenzeichen: 199 57 163.5-34  
22 Anmeldetag: 27. 11. 1999  
43 Offenlegungstag: -  
45 Veröffentlichungstag  
der Patenterteilung: 9. 8. 2001

Innerhalb von 3 Monaten nach Veröffentlichung der Erteilung kann Einspruch erhoben werden

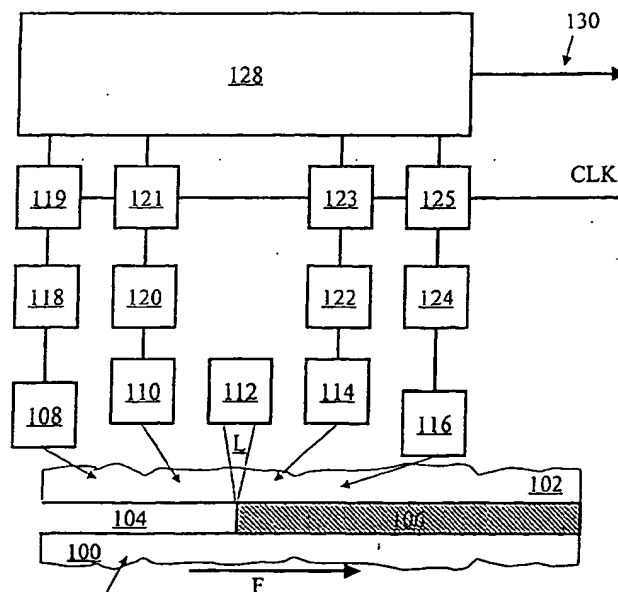
73 Patentinhaber:  
Thyssen Krupp Stahl AG, 40211 Düsseldorf, DE  
74 Vertreter:  
COHAUSZ & FLORACK, 40472 Düsseldorf

72 Erfinder:  
Esser, Gregor, 46242 Bottrop, DE; Koch, Martin,  
Dr.rer.nat., 47506 Neukirchen-Vluyn, DE;  
Stegemann-Auhage, Thomas, 38524 Sassenburg,  
DE

56 Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht  
gezogene Druckschriften:  
EP 06 55 294 A1  
SEPOLD G., (u.a.): Perspektiven der Laser-  
materialbearbeitung großer Strukturen, In:  
Schlüsseltechnologie Laser: Herausforderung an  
die Fabrik 2000, Vorträge des 12. Int. Kongresses  
(LASER'95), Hrsg.: GEIGER M., Bamberg, Meisen-  
bach-Verlag, 1995, S. 275-284;  
DILTHEY U., (u.a.): On-line-Qualitätskontrolle  
beim Metall-Schutzgasschweißen durch künstliche  
neuronale Netze, In: Schweißen und Schneiden,  
1997, H. 2, S. 75,75,78-80;

54 Verfahren und Vorrichtung zur Qualitätskontrolle der Naht an mit einem Laser stumpf geschweißten Blechen  
oder Bändern

57 Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Qualitätskon-  
trolle der Naht an mit einem Laser stumpf geschweißten  
Blechen oder Bändern, bei welchem eine Vielzahl von  
Sensordaten von mindestens zwei um den Schweißort  
angeordneten Sensoren gemessen wird und bei dem die  
Sensordaten zumindest einer zusammenfassenden und  
korrelierenden Meßdatenverarbeitung zur Qualitätsbeur-  
teilung der Schweißnaht als Eingangsgröße zugeführt  
werden. Für eine zeitnahe Qualitätskontrolle der  
Schweißnaht, welche eine realitätsgetreue Analyse des  
Schweißergebnisses ermöglicht, ist vorgesehen, daß die  
gespeicherten Daten als Eingangsgrößen mindestens ein-  
em trainierbaren, künstlichen neuronalen Netz mit einer  
im wesentlichen hierarchischen Netzstruktur zugeführt  
werden, daß das mindestens eine trainierbare, künstliche  
neuronale Netz mit im wesentlichen hierarchischer Netz-  
struktur aus mindestens zwei im wesentlichen unabhän-  
gigen, trainierbaren, künstlichen neuronalen Teilnetzen  
gebildet wird, daß das erste künstliche neuronale Teilnetz  
aus mindestens zwei unabhängigen, künstlichen neuro-  
nalen Teilnetzen gebildet wird, daß den ersten künstli-  
chen neuronalen Teilnetzen jeweils die Ergebnisse der  
Datenvorverarbeitungen als Eingangsgrößen zugeführt  
werden, daß dem zweiten künstlichen neuronalen Teil-  
netz die Ergebnisse der ersten künstlichen neuronalen  
Teilnetze als Eingangsgrößen zugeführt werden und daß  
das Ergebnis des mindestens einen künstlichen neuro-  
nalen Netzes zur Qualitätskontrolle genutzt wird.



Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren zur Qualitätskontrolle der Naht an mit einem Laser stumpf geschweißten Blechen oder Bändern, bei welchem eine Vielzahl von Sensordaten von mindestens zwei um den Schweißort angeordneten Sensoren gemessen wird und bei welchem die Sensordaten zumindest einer zusammenfassenden und korrelierenden Meßdatenverarbeitung zur Qualitätsbeurteilung der Schweißnaht als Eingangsgröße zugeführt werden, bei welchem die Sensordaten von zumindest einem am Schweißort angeordneten, das Schweißplasma erfassenden Sensor gemessen werden, bei welchem die Sensordaten von zumindest einem nach dem Schweißort angeordneten, die Schweißnahtgeometrie erfassenden Sensor gemessen werden, bei welchem bei der korrelierenden und zusammenfassenden Meßdatenverarbeitung die Vielzahl der Sensordaten der mindestens zwei Sensoren jeweils als Eingangsgröße mindestens einer Datenvorverarbeitung zugeführt wird, bei welchem die Ergebnisse der Datenvorverarbeitung zum Zweck des ortsgleichen Bezugs der Sensordaten jeweils in einer Speichereinheit gespeichert werden.

Aus der EP 0 655 294 ist es bekannt, die Nahtqualität einer Laserschweißnaht mit Hilfe von gleichzeitig durchgeführten Temperaturmessungen zu bestimmen. Hierzu werden mittels pyrometrischer Temperaturmessungen charakteristische, prozeßsensible Daten ermittelt und für eine Qualitätskontrolle aufbereitet. Bei diesem Verfahren werden an mindestens zwei definierten Stellen der Schweißnaht Temperaturmessungen mit Hilfe von vorzugsweise schnellen Pyrometern durchgeführt. Die gemessenen Signale der einzelnen Pyrometer werden mittels einer elektronischen Signalverarbeitung miteinander in Bezug gebracht. Zusätzlich werden die vom Laserschweißaggregat standardmäßig gewonnenen Meßwerte hinzugezogen und mit den Pyrometermeßwerten wiederum logisch verknüpft. Diese zusammenfassende und korrelierende Meßdatenverarbeitung ermöglicht es, mit Hilfe der gemessenen Prozeßgrößen eine Qualitätsbeurteilung der Schweißnaht durchzuführen.

Nachteilig bei diesem Verfahren ist es, daß mit einer wachsenden Anzahl von gemessenen Prozeßgrößen aufgrund ihrer wechselseitigen Beeinflussungen im Schweißprozeß die Analyse durch eine regelbasierte Modellbildung erschwert wird.

Aus "Perspektiven der Lasermaterialbearbeitung großer Strukturen" Sepold, Egler; in: Schlüsseltechnologie Laser: Herausforderung an die Fabrik 2000; Vorträge des 12. Int. Kongresses (LASER '95); Hrsg.: Geiger M., Bamberg, Meisenbach-Verlag, 1995, S. 275-284 ist bekannt, die Systemintelligenz von Lasermaterialbearbeitungsanlagen durch den Einsatz von Sensoren zu erhöhen, wodurch auf Prozeß- und Werkstückunregelmäßigkeiten on-line reagiert werden kann. Dazu wird vorgeschlagen, einen Sensor vor, über und nach dem Bearbeitungsort des Lasers anzuordnen und die Messdaten einem Prozessrechner zuzuführen.

Nachteilig an diesem Verfahren ist, daß die Messdatenverarbeitung nur statisch auf bekannte Systemzustände reagieren kann. Bei unbekannten Zuständen versagt die statische Messdatenverarbeitung.

Aus "On-line-Qualitätskontrolle beim Metall-Schutzgas-schweißen durch künstliche neuronale Netze"; in: Schweißen und Schneiden, 1997, H.2, S. 75-80 ist der Einsatz von künstlichen neuronalen Netzen in der Laserschweißtechnik bekannt. Zur Qualitätsbeurteilung werden Daten über die Schweißnaht vom einem künstlichen neuronalen Netz verarbeitet. Die neuronalen Netze können aufgrund ihrer Struktur mit einer Vielzahl von Messdaten umgehen. Außerdem können sie auch dann eine Qualitätsbeurteilung von Schweiß-

nahten durchführen, wenn unbekannte Systemzustände auftreten.

Nachteilig an diesem Verfahren ist, daß es nicht möglich ist, die Einflüsse einzelner Messdaten auf die Nahtqualität zu beurteilen. Das bekannte neuronale Netz liefert als Ergebnis nur Gut-/Schlecht-Entscheidungen, wobei dem Anwender nicht bekannt ist, welchen Einfluß die einzelnen Messdaten auf die Entscheidungsfindung haben.

Der vorliegenden Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, eine zeitnahe Qualitätskontrolle von Schweißnähten vorzunehmen, welche eine realitätsgetreue Analyse des Schweißergebnisses ermöglicht.

Diese Aufgabe wird dadurch gelöst, daß die gespeicherten Daten als Eingangsgrößen mindestens einem trainierbaren, künstlichen neuronalen Netz mit einer im wesentlichen hierarchischen Netzstruktur zugeführt werden, daß das mindestens eine trainierbare, künstliche neuronale Netz mit im wesentlichen hierarchischer Netzstruktur aus mindestens zwei im wesentlichen unabhängigen, trainierbaren, künstlichen neuronalen Teilnetzen gebildet wird, daß das erste künstliche neuronale Teilnetz aus mindestens zwei unabhängigen, künstlichen neuronalen Teilnetzen gebildet wird, daß den ersten künstlichen neuronalen Teilnetzen jeweils die Ergebnisse der Datenvorverarbeitungen als Eingangsgrößen zugeführt werden, daß dem zweiten künstlichen neuronalen Teilnetz die Ergebnisse der ersten künstlichen neuronalen Teilnetze als Eingangsgrößen zugeführt werden, und daß das Ergebnis des mindestens einen künstlichen neuronalen Netzes zur Qualitätskontrolle genutzt wird.

Das erfindungsgemäße Verfahren ermöglicht eine zeitnahe Qualitätskontrolle der Naht einer Laserschweißung, indem es mindestens ein hierarchisches künstliches neuronales Netz zur Verarbeitung einer Vielzahl von Sensordaten nutzt. Es hat sich gezeigt, daß dafür am aussagekräftigsten die Sensordaten über das Schweißplasma und die Schweißnahtgeometrie sind. Durch die Speichereinheiten werden die zu einem Schweißnahtort zugehörigen Sensordaten parallel dem künstlichen neuronalen Netz zugeführt werden, wodurch die örtliche Korrelation der zu den jeweiligen Schweißnahtorten zugehörigen Signale durch das künstliche neuronale Netz zeitnah durchgeführt werden kann. Durch die Verwendung zweier unabhängiger künstlicher neuronaler Netze wird in den ersten künstlichen neuronalen Teilnetzen die Fülle der Daten auf ein relevantes Minimum reduziert und im zweiten neuronalen Teilnetz werden diese Daten miteinander korreliert. Außerdem ist es dadurch auch möglich, die Ergebnisse der ersten künstlichen neuronalen Teilnetze getrennt voneinander zu betrachten und gegebenenfalls zur Steuerung von verschiedenen Schweißmaschinen-Parametern zu nutzen. Weiterhin können diese Ergebnisse gespeichert werden und für den Fall eines im nachhinein auftretenden Defektes der Schweißnaht die Ursache hierfür mit Hilfe dieser Daten gesucht werden. Dies ist im Fall der Produkthaftung von Vorteil. Durch die Verwendung von künstlichen neuronalen Netzen mit hierarchischer Netzstruktur ist es möglich, sehr viele Sensoren für die Qualitätsaussage nutzen und die Vielzahl der Sensordaten in ihren vielfältigen Kombinationsmöglichkeiten auswerten zu können. Es ist durchaus möglich, neben den Prozeßparametern auch noch Maschinenparameter, wie die des Laser, z. B. Leistung, Mode, Leistungsverteilung, Fokusslage, sowie die der Schweißanlage, z. B. Andruckkraft, Schutzgase, Nahtkühlung und Vorschubgeschwindigkeit auszuwerten. Auch können externe Einflüsse, die z. B. die Funktion der Sensoren beeinträchtigen können, wiederum in die Beurteilung mit einfließen. Dabei ist an die Beleuchtung und die Temperatur in der Produktionshalle zu denken. Außerdem kann selbst mit verrauschten Signalen noch ein befriedigendes

Ergebnis erzielt werden.

Ein Verfahren, bei dem zusätzlich ein Sensor für die Erfassung der Spaltgeometrie verwendet wird, bei welchem der Sensor vor dem Schweißort angeordnet wird, ist bevorzugt. Mit Hilfe dieses Sensors kann die Größe des Kantenversatzes vor der Schweißung erfaßt werden, wodurch eine Aussage über die Qualität der Schweißung abhängig vom Kantenversatz möglich ist. Außerdem könnte mit Hilfe dieser Information die Position der Bleche zueinander noch während des Schweißvorgangs nachgeregelt werden.

Eine Qualitätsaussage über die Schweißung in Abhängigkeit vom Fügspalt ist durch ein Verfahren, bei dem ein zusätzlicher vor dem Schweißort angeordneter Sensor für die Erfassung des Fügspaltes verwendet wird möglich. Mit Hilfe dieses Sensors wird die Größe des Fügspaltes vor der Schweißung erfaßt. Außerdem kann mit Hilfe dieser Information der Fügspalt noch während des Schweißvorgangs nachgeregelt werden.

Nach einer weiteren Ausgestaltung der Erfindung wird ein Sensor für die Erfassung der Schweißnahttemperatur kurz hinter dem Schweißort verwendet.

Eine effektive und schnelle Beurteilung der Sensordaten wird möglich, wenn jedes erste künstliche neuronale Teilnetz aus drei Schichten gebildet wird, bei welchem die erste Schicht aus genau einem Neuron gebildet wird, die zweite Schicht aus einer Vielzahl von Neuronen gebildet wird und die dritte Schicht aus genau einem Neuron gebildet wird. Außerdem wird hierdurch eine Aussage über die Fehlerwahrscheinlichkeit unter Ausnutzung eines Prozeßparameters automatisiert.

Gemäß einer weiteren Ausgestaltung wird das zweite, künstliche neuronale Teilnetz aus drei Schichten gebildet, bei welchem die erste Schicht aus einer Vielzahl von Neuronen gebildet wird, die zweite Schicht aus einer Vielzahl von Neuronen gebildet wird und die dritte Schicht aus genau einem Neuron gebildet wird. Dadurch, daß eine Vielzahl von Eingangsneuronen vorhanden sind, können die Ausgänge der Vielzahl der ersten neuronalen Teilnetze parallel dem zweiten gemeinsamen künstlichen neuronalen Teilnetz zugeführt werden. Dies ermöglicht eine parallele Korrelation der einzelnen Sensordaten miteinander, wodurch eine Qualitätsaussage über die Schweißnaht unter Berücksichtigung einer Vielzahl von Sensordaten möglich ist. Das eine Ausgangsneuron der dritten Schicht liefert ein Signal, welches eine Qualitätsaussage über die Naht der Laserschweißung ermöglicht.

Weiterhin ist vorgesehen, den Lernprozeß des künstlichen neuronalen Netzes mit Hilfe eines Backpropagation Lernalgorithmus durchzuführen, bei welchem die ersten künstlichen neuronalen Teilnetze bei einer Lernrate  $\eta$  zwischen 0,01 und 0,1 und einem Momentum  $\alpha$  zwischen 0,1 und 0,6 justiert werden und bei welchem das zweite künstliche neuronale Teilnetz bei einer Lernrate  $\eta$  und einem Momentum  $\alpha$ , die im wesentlichen dem Gradientenverlauf einer Fehlerfunktion des Ausgangs des künstlichen neuronalen Teilnetzes angepaßt werden, justiert wird. Die Fehlerfunktion des Ausgangs des künstlichen neuronalen Teilnetzes wird z. B. dadurch gebildet, daß die Summe der Quadrate der Differenzen zwischen Ist- und Sollausgang ermittelt wird. Die Wichtung der einzelnen Netzelemente der Teilnetze wird während der Lernphase dahingehend angepaßt, daß diese Fehlerfunktion ein Minimum erreicht. Die ersten und das zweite Teilnetz werden in einem Zuge angepaßt. Die Netzkonfiguration, die vor dem Training gefunden wurde, bleibt auch während der Testphase unverändert. Mit Hilfe eines adaptiven Lernalgorithmus kann die Lernrate und das Momentum des zweiten neuronalen Teilnetzes dem Gradientenverlauf dieser Fehlerfunktion angepaßt werden, was zur

Folge hat, daß das globale Minimum der Fehlerfunktion mit großer Wahrscheinlichkeit gefunden wird und lokale Minima der Fehlerfunktion übergangen werden.

Um aus den Sensordaten die Informationen herauszufiltern, die für die Qualitätsaussage relevant sind, wird bei der Datenvorverarbeitung eine Merkmalsextraktion der Sensordaten durchgeführt. Dadurch wird eine enorme Datenreduktion erreicht, die zu einer beschleunigten Berechnung in den angeschlossenen Systemen führt, was eine zeitnahe Qualitätsaussage ermöglicht.

Bei der Merkmalsextraktion der die Spaltbreite charakterisierenden Sensordaten werden vorzugsweise die von einem vor dem Schweißort angeordneten Sensor gemessenen Sensordaten jeweils als Eingangsgröße einer Fehlerunterdrückung zugeführt, die Ergebnisse der Fehlerunterdrückung jeweils als Eingangsgröße einer im wesentlichen frei definierbaren Fenstermittlung zugeführt und die Differenz der Ergebnisse der Fenstermittlung gebildet. Die Fehlerunterdrückung filtert Sensordaten, die aufgrund von Fehlmessungen entstehen, heraus. Die Fenstermittlung dient zur Unterdrückung von Rauscheinflüssen in den Sensordaten. Durch die Bildung des Differenzwertes ist es möglich, eine Aussage über die Spaltbreite zu treffen.

Weiterhin können bei der Merkmalsextraktion der die Plasmaintensität charakterisierenden Sensordaten die von einem Plasmaintensitätssensor gemessenen Sensordaten als Eingangsgröße einer Fenstertransformation zugeführt werden. Die Fenstertransformation erlaubt es, aus den gemessenen Plasmaintensitätsdaten die für die Beurteilung der Nahtqualität relevanten Daten herauszufiltern.

Nach einer weiteren bevorzugten Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens ist es vorgesehen, daß bei der Merkmalsextraktion der den Nahteinfall charakterisierenden Sensordaten die von einem Geometriesensor gemessenen Sensordaten als Eingangsgröße einer Fenstermittlung zugeführt werden. Durch verschiedene Fensterbreiten der Fenstermittlung können lokale, als auch tendenzielle Signalveränderungen gezielt bewertet werden.

Ein Verfahren, bei welchem zur Merkmalsextraktion der den Kantenversatz wiedergebenden Sensordaten die von einem Geometriesensor gemessenen Sensordaten als Eingangsgröße einer Mittelwertstransformation zugeführt werden und das Ergebnis der Mittelwertstransformation einer Fenstermittlung zugeführt wird, ist eine weitere Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens. Durch die Mittelwertstransformation ist es möglich, das Signal um den Gesamtmittelwert zu bereinigen. Die Fenstermittlung ermöglicht es, tendenzielle Veränderungen des Kantenversatzes herauszufiltern. Der Kantenversatz kann sowohl vor, als auch nach der Schweißung gemessen werden. Insbesondere ist es beim Rondschiessen möglich, mit Hilfe nur eines Geometriesensors den Kantenversatz vor, als auch nach der Schweißung zu messen.

Um den Fehlerwert der einzelnen Sensordaten auf einen gemeinsamen Wertebereich zu beschränken, sind die Ergebnisse der ersten künstlichen neuronalen Teilnetze jeweils wertbereichsnormiert und werden dem zweiten künstlichen neuronalen Teilnetz zugeführt. Der Maximalwert dieses Wertebereichs kann z. B. eine maximale Fehlerwahrscheinlichkeit des lokal gemessenen Prozeßparameters bedeuten.

Ein weiterer Gegenstand der Erfindung ist eine Vorrichtung mit mindestens zwei Sensoren zur Erfassung von Sensordaten, die um den Schweißort angeordnet sind, wobei ein das Schweißplasma erfassender Sensor am Schweißort angeordnet ist, und wobei ein die Nahtgeometrie erfassender Sensor nach dem Schweißort angeordnet ist, deren Sensordaten jeweils einer Datenvorverarbeitung als Eingangsgröße dienen, die die Speichereinheiten aufweist, die die Ergebnisse

der Datenvorverarbeitung zum Zweck des ortsgleichen Bezugs abspeichern. Die Vorrichtung ist dadurch gekennzeichnet, daß die Einträge der Speichereinheiten als parallele Eingangsgrößen einer im wesentlichen trainierbaren, künstlichen neuronalen Netzstruktur dienen und daß das Ergebnis der neuronalen Netzstruktur der qualitativen Beurteilung der Schweißnaht dient. Durch die parallele Erfassung der Sensordaten, sowie die Berechnung durch ein im wesentlichen trainierbares, künstliches neuronales Netz ist eine zeitnahe Beurteilung der Schweißnahtqualität möglich.

In einer Ausgestaltung der erfindungsgemäßen Vorrichtung wird ein Geometriesensor vor dem Schweißort angeordnet. Außerdem kann ein Pyrosensor am Schweißort angeordnet werden. Daß ein Spaltsensor vor dem Schweißort angeordnet ist, ist ebenso vorteilhaft. Die Anordnung von mehreren Sensoren ermöglicht es, eine Vielzahl von Prozeßparametern während des Schweißens zu erfassen. Außerdem ist die Qualitätsaussage davon abhängig, wie viele verschiedene Prozeßparameter gemessen werden, wodurch die Vorrichtung so gestaltet sein muß, daß eine Vielzahl von Sensorsignalen aufgenommen und verarbeitet werden können.

Nachfolgend wird die Erfindung anhand einer Ausführungsbeispiele darstellenden Zeichnung näher erläutert. Es zeigen:

**Fig. 1** eine Vorrichtung zur Qualitätskontrolle einer Schweißnaht,

**Fig. 2** eine hierarchische Netzstruktur eines künstlichen neuronalen Netzes,

**Fig. 3** einen Aufbau des ersten künstlichen neuronalen Teilnetzes,

**Fig. 4** eine Fenstertransformation der Sensordaten,

**Fig. 5** einen Aufbau des zweiten künstlichen neuronalen Teilnetzes,

**Fig. 6** eine schematische Darstellung eines erfindungsgemäßen Verfahrens.

**Fig. 1** zeigt ein erstes Ausführungsbeispiel einer Vorrichtung zur Qualitätskontrolle einer Naht von mit einem Laser stumpf geschweißten Blechen oder Bändern. Zwei miteinander stumpf zu verschweißende Bleche oder Bänder **100**, **102** werden mit einer nicht dargestellten Transport- und Fügevorrichtung mit einem vorgegebenen Fügespalt **104** unter einen Schweißkopf **112** einer Laserschweißanlage in Förderrichtung **F** transportiert. Im Bereich des Schweißkopfes **112** werden die Bleche **100**, **102** in einer Schweißnaht **106** mit einem Laserstrahl **L** stumpf miteinander verschweißt.

Entlang der Schweißnaht **106** bzw. des Fügespalt **104** sind Sensoren **108**, **110**, **114** und **116** angeordnet. Der Sensor **108** erfaßt die Geometrie des Fügespalt **104** im Vorlauf der Schweißung. Dabei wird der vertikale Kantenversatz der Bleche durch den Sensor **108** gemessen. Der Sensor **110** erfaßt die Spaltbreite des Fügespalt **104**. Dabei wird der Abstand der Bleche **100**, **102** durch dafür geeignete Sensoren gemessen, die z. B. nach dem Lichtschnitt- bzw. Durchlichtverfahren arbeiten. Der Sensor **114** dient der Erfassung der Plasmaintensität des Laserschweißstrahls **L**. Der Geometriesensor **116** dient der Erfassung des Kantenversatzes als auch des Nahteinfalls der Schweißnaht **106** im Nachlauf der Schweißung. Bei einer Rondscheißung (nicht dargestellt) kann die Geometrie des Fügespalt **104** als auch die der Schweißnaht **106** durch nur einen Sensor erfaßt werden. Außerdem kann mit Hilfe eines Pyrosensors (nicht dargestellt) die Schweißtemperatur ermittelt werden.

Die von den Sensoren **108**, **110**, **114** und **116** erfaßten Sensordaten werden von Datenvorverarbeitungseinheiten **118**, **120**, **122** und **124** in regelmäßigen Abständen abgefragt. Die Abfragefrequenz liegt bei den einzelnen Datenvorverarbeitungseinheiten zwischen wenigen Hertz und ei-

nigen Kilohertz.

Die vom Sensor **108** gemessenen Daten werden von der Datenvorverarbeitungseinheit **118** in regelmäßigen Abständen eingelesen. Für den vom Sensor **108** vermessenen Kantenversatz wird mit Hilfe einer Fenstermittlung der arithmetische Mittelwert dieser Sensordaten über die Fensterbreite errechnet. Die errechneten arithmetischen Mittelwerte der einzelnen Fenster werden um den Gesamtmittelwert bereinigt.

Die von der Datenvorverarbeitungseinheit **120** eingelesenen Sensordaten des Spaltsensors **110** für die Position der rechten sowie der linken Kante des Fügespalt **104** werden mittels Interpolation und linearer Polynome rekonstruiert, da die Sensorsignale aufgrund fehlerhafter Messungen mit starken Abweichungen vom tatsächlichen Nahtverlauf behaftet sind. Aus den rekonstruierten Sensordaten wird mit Hilfe einer Fenstermittlung ein arithmetischer Mittelwert gebildet. Aus den so erhaltenen arithmetischen Mittelwerten der Sensordaten der rechten, sowie der linken Kante des Fügespalt **104** wird die Differenz gebildet, die Auskunft über die Größe der Spaltaufweitung gibt.

Die vom Plasmasensor **114** gemessenen Sensordaten werden von der Datenvorverarbeitungseinheit **122** eingelesen, welche gemäß der in **Fig. 4** dargestellten Vorgehensweise verarbeitet werden. Die Sensordaten werden dabei dem Eingang **400** zugeführt. Aus diesen Sensordaten wird in der Einheit **402** mit Hilfe einer Fenstermittlung der arithmetischen Mittelwert der jeweils letzten **10** gemessenen Sensordaten errechnet. In der Einheit **404** wird die Differenz aus dem aktuell gemessenen Sensorwert und dem Ergebnis der Einheit **402** berechnet. In der Einheit **406** wird der Gesamtmittelwert des Ausgangssignals der Einheit **404** berechnet. Aus dem Ausgangswert der Einheit **406** wird in der Einheit **408** die globale Standardabweichung berechnet. In der Einheit **410** wird mit Hilfe einer Fenstermittlung der arithmetischen Mittelwert der letzten **10** Ergebnisse der Einheit **404** errechnet. Die Einheit **412** errechnet mit Hilfe der Ergebnisse der Einheiten **410** und **404** die lokale Standardabweichung. In der Einheit **414** wird der maximale Unterschied zwischen dem Ausgang der Einheit **404** und dem Ausgang der Einheit **410** berechnet. In der Einheit **416** wird das Ergebnis der Datenvorverarbeitung derart berechnet, daß das Ergebnis der Einheit **414** mit dem Ergebnis der Einheit **412** multipliziert wird und der so errechnete Wert durch das Ergebnis der Einheit **408** geteilt wird.

Die von der Datenvorverarbeitungseinheit **124** eingelesenen Sensordaten des Sensors **116** werden einer Fenstertransformation zur Mittelwertbildung unterzogen. Hierbei kann die Fensterbreite so eingestellt werden, daß sich sowohl lokale, als auch tendenzielle Veränderungen des Nahteinfalls der Schweißnaht **106** in der Mittelwertberechnung bemerkbar machen. Bei einer Fensterbreite von zehn Datenpunkten ergibt sich bei einer kurzzeitigen Änderung des Nahteinfalls eine stärkere Änderung des arithmetischen Mittelwertes als bei einer Fensterbreite von vierzig Datenpunkten.

Die mit Hilfe der Datenvorverarbeitungseinheiten **118**, **120**, **122** und **124** berechneten Werte werden in Speichereinheiten **119**, **121**, **123** und **125** gespeichert. Mit Hilfe dieser Speichereinheiten ist es möglich, die Daten aller Sensoren, die zu ein und dem selben Schweißnahtpunkt gehören, zum gleichen Zeitpunkt dem künstlichen neuronalen Netz **128** zuzuführen. Da die Sensordaten eines Schweißnahtpunktes von den Sensoren **108** bis **116** zu unterschiedlichen Zeitpunkten gemessen werden, die Sensordaten durch die Datenvorverarbeitungseinheiten **118**, **120**, **122** und **124** in unterschiedlichen Intervallen abgefragt werden und die Datenvorverarbeitung der verschiedenen Sensordaten jeweils einen anderen Rechenaufwand erfordern, liegen die Daten zu

einem Schweißnahtpunkt nicht gleichzeitig am Ausgang der Datenvorverarbeitungseinheiten 118, 120, 122 und 124 vor. Durch die Speicherung der Daten in den Einheiten 119, 121, 123 und 125 wird dieser zeitliche Versatz ausgeglichen, so daß das künstliche neuronale Netz 128 Daten eines Schweißnahtpunktes auch zu einem Zeitpunkt erhält. Erst dadurch ist die Korrelation der Sensordaten durch das künstliche neuronale Netz 128 möglich. Die Speichereinheiten 119, 121, 123 und 125 werden durch ein gemeinsames Taktsignal CLK angesteuert. Die gespeicherten Daten, die zu einem Schweißnahtpunkt gehören, werden bei anliegen des Taktsignals dem trainierbaren, künstlichen neuronalen Netz 128 zugeführt. In diesem künstlichen neuronalen Netz 128 wird aus den Daten der Datenvorverarbeitungseinheiten 118, 120, 122 und 124 ein Ausgangssignal 130 berechnet, mit dessen Hilfe eine Aussage über die Qualität der Schweißnaht getroffen wird.

In Fig. 2 ist das trainierbare, künstliche neuronale Netz 128 mit im wesentlichen hierarchischer Netzstruktur dargestellt. Das neuronale Netz 128 besteht aus einer Vielzahl von ersten künstlichen neuronalen Teilnetzen 218, 220, 222 und 224 sowie einem zweiten künstlichen neuronalen Teilnetz 242. Die Ergebnisse der Datenvorverarbeitungseinheiten 118, 120, 122 und 124 werden jeweils einem ersten künstlichen neuronalen Teilnetz 218, 220, 222 oder 224 zugeführt.

Die Netzstruktur der ersten künstlichen neuronalen Teilnetze 218, 220, 224 und 226 ist in Fig. 3 dargestellt. Sie besteht aus einer Eingangsschicht 316, einer verdeckten Schicht 318 sowie einer Ausgangsschicht 320. Die Eingangsschicht 316 besteht aus einem Eingangsneuron 300. Der Eingangswert 301 des ersten künstlichen neuronalen Teilnetzes, der ein Ausgangswert einer Datenvorverarbeitung ist, wird vom Eingangsneuron 300 auf die Neuronen der verdeckten Schicht 318 mit unterschiedlichen Gewichtungen verteilt. Die verdeckte Schicht 318 besteht aus einer Vielzahl von Neuronen 302–312.

Mit Hilfe einer Aktivierungsfunktion wird aus dem gewichteten Eingangssignal jedes einzelnen Neurons die Größe des Ausgangssignals bestimmt. Die Aktivierungsfunktion kann z. B. eine Sigmoidalfunktion oder eine Tangenshyperbolicusfunktion sein.

Aus der Summe der gewichteten Eingangssignale und einem Schwellwert als Eingangswert einer Aktivierungsfunktion errechnet sich die Größe des Ausgangssignals wie folgt:

$$Y_j = F_j(\Sigma \omega_{ij} \cdot X_i + \theta_j)$$

dabei bedeutet:

$Y_j$ : Größe des Ausgangssignals,

$F_j$ : Aktivierungsfunktion,

$\omega_{ij}$ : Wichtung der Eingangssignale,

$X_i$ : Eingangssignal des Neurons,

$\theta_j$ : Schwellwert des Neurons.

Die Ausgangssignale der Neuronen der verdeckten Schicht 318 werden dem Neuron der Ausgangsschicht 314 zugeführt. Auch hier wird wiederum mit Hilfe von Wichtungen der Eingangssignale, einer Aktivierungsfunktion und einem Schwellwert die Größe des Ausgangssignals 316 berechnet.

Die Ausgänge der ersten künstlichen neuronalen Teilnetze 218–224 sind jeweils wertbereichsnormiert. Durch diese Wertbereichsnormierungen die Ausgänge der ersten künstlichen neuronalen Teilnetze 218–224 auf einen Wertebereich von z. B. 0–1 normiert. Die Ausgänge der ersten künstlichen neuronalen Teilnetze 218–224 können somit als lokale Fehlerwerte betrachtet werden. So bedeutet z. B. ein Ausgangswert des künstlichen neuronalen Teilnetzes 224 von 1, daß die Fehlerwahrscheinlichkeit im Fall des Nah-

teinfalls 100% beträgt. Ein Ausgangswert des künstlichen neuronalen Teilnetzes 218 von 0,5 bedeutet, daß die Fehlerwahrscheinlichkeit des dem ersten künstlichen neuronalen Teilnetz 218 zugeordneten Prozeßparameters Kantenversatz, welcher durch einen Geometriesensor gemessen wurde, 50% beträgt.

Die einzelnen lokalen Fehlerwahrscheinlichkeiten werden dem zweiten künstlichen neuronalen Teilnetz 242 parallel zugeführt.

Die Struktur des zweiten künstlichen neuronalen Teilnetzes 242 ist in Fig. 5 dargestellt. Das zweite künstliche neuronale Teilnetz 242 besteht aus einer Eingangsschicht 516, einer verdeckten Schicht 518 sowie einer Ausgangsschicht 520. Die Eingangsschicht 516 besteht aus einer Vielzahl von Neuronen 532, 534, 536 und 538. Die Eingangswerte der Neuronen der Eingangsschicht 516 des zweiten künstlichen neuronalen Teilnetzes 242 sind die jeweiligen Ausgangswerte der Wertbereichsnormierungen der ersten künstlichen neuronalen Teilnetze 218–224. Die Größe der Ausgangssignale wird in den Neuronen 532–538 wiederum mit Hilfe einer Aktivierungsfunktion sowie einer Wichtung des Eingangssignals und einem Grenzwert berechnet, wie es anhand der Fig. 3 weiter oben beschrieben worden ist.

In der verdeckten Schicht 518 befinden sich eine Vielzahl von Neuronen 502–512. Diesen Neuronen werden die Ausgangssignale aller Neuronen 532–538 der Eingangsschicht 516 zugeführt.

Die Eingänge aller Neuronen 502 bis 512 werden gewichtet. Mit Hilfe einer Aktivierungsfunktion und einem Grenzwert werden die Ausgangssignale der Neuronen 502 bis 512 berechnet.

In der Ausgangsschicht 520 befindet sich lediglich ein Neuron 514, dem die Ausgangssignale der Neuronen 502–512 der verdeckten Schicht 518 zugeführt werden. Hier werden wiederum die Eingangssignale gewichtet, die Summe der gewichteten Eingangssignale mit einem Schwellwert addiert und das Ergebnis dient als Eingangsgröße für eine Aktivierungsfunktion. Das sich daraus ergebende Ausgangssignal wird zur Qualitätsbeurteilung der Schweißnaht genutzt. Die einzelnen Wichtungen der Eingangssignale der Neuronen in den ersten künstlichen neuronalen Teilnetzen 218–224 sowie den zweiten künstlichen neuronalen Teilnetzen 242 werden während einer Trainingsphase so eingerichtet, daß die Aussage des künstlichen neuronalen Netzes 128 der eines manuellen Betrachters nachgebildet wird. Mit Hilfe von Referenzschweißungen kann ein Soll-/Istwertvergleich am Ausgang des künstlichen neuronalen Netzes 128 durchgeführt werden und die Wichtungen stellen sich mit Hilfe des Backpropagation Lernalgorithmus ein.

Das zweite künstliche neuronale Teilnetz 242 ermittelt aus der Vielzahl der Eingangswerte einen Ausgangswert 244, der eine Aussage über die Schweißnahtqualität ermöglicht. Durch das zweite künstliche neuronale Teilnetz 242 wird die Wechselwirkung zwischen den einzelnen Prozeßparametern berücksichtigt. Es ist durchaus möglich, daß die Fehlerwahrscheinlichkeit des Prozeßparameters Nahtteufall bei 80% liegt, doch durch das Zusammenspiel mit anderen Prozeßparametern die Gesamtfehlerwahrscheinlichkeit der Schweißnaht bei 10% liegt.

Die einzelnen Verfahrensschritte sind in Fig. 6 in ihrer logischen Reihenfolge dargestellt. Zunächst werden Sensordaten 600 durch unterschiedliche Sensoren, wie z. B. Geometriesensoren, Spaltbreitensensoren, Pyrosensoren als auch Plasmasensoren erfaßt. Diese Sensordaten werden der Datenanalyse durch die künstlichen neuronalen Netze 602 zugeführt. Anhand der von den künstlichen neuronalen Netzen ermittelten Werte ist eine Nahtbeurteilung 604 möglich. Weiterhin ist eine Aussage über den Zustand der Schweiß-

anlage, z. B. der Vorschubgeschwindigkeit, der Nachkühlung, der Schweißleistung oder auch der Andruckkraft möglich. Die Ergebnisse der Nahtbeurteilung als auch die Sensordaten werden in einer Datenbank **608** gespeichert. Die in der Datenbank **608** gespeicherten Datensätze werden zur Produkt- und Anlagenbewertung genutzt. Weiterhin dienen diese Daten dem Nachweis im Falle eventueller Produkthaltung. Außerdem können diese Daten als Beleg für eine Qualitätszertifizierung dienen.

Weiterhin werden die Ergebnisse der Nahtbeurteilung **604** zum Aufbau eines Regelkreises **610** genutzt. Die Daten werden einerseits zur Regelung der Anlagentechnik **603a** und andererseits zur Regelung der Lasertechnik **603b** genutzt. Die Anlagentechnik umfaßt Einstellungen der Schweißanlage, wie die Andruckkraft, die Zuführung von Schutzgasen und die Nachkühlung sowie die Vorschubgeschwindigkeit der zu verschweißenden Bleche. Die Regelung der Lasertechnik **603b** beinhaltet die Regelung der Schweißleistung, der Schweißtemperatur, der Leistungsverteilung als auch der Fokusslage des Schweißstrahls. Mit Hilfe des erfindungsgemäßen Verfahrens ist es somit möglich, einerseits Aussagen über die Produktqualität treffen zu können und andererseits on-line Anlagenparameter einstellen zu können.

#### Patentansprüche

1. Verfahren zur Qualitätskontrolle der Naht an mit einem Laser stumpf geschweißten Blechen oder Bändern
  - bei welchem eine Vielzahl von Sensordaten von mindestens zwei um den Schweißort angeordneten Sensoren gemessen wird,
  - bei welchem die Sensordaten zumindest einer zusammenfassenden und korrelierenden Meßdatenverarbeitung zur Qualitätsbeurteilung der Schweißnaht als Eingangsgröße zugeführt werden,
  - bei welchem die Sensordaten von zumindest einem am Schweißort angeordneten, das Schweißplasma erfassenden Sensor gemessen werden,
  - bei welchem die Sensordaten von zumindest einem nach dem Schweißort angeordneten, die Schweißnahtgeometrie erfassenden Sensor gemessen werden,
  - bei welchem bei der korrelierenden und zusammenfassenden Meßdatenverarbeitung die Vielzahl der Sensordaten der mindestens zwei Sensoren jeweils als Eingangsgröße mindestens einer Datenvorverarbeitung zugeführt wird,
  - bei welchem die Ergebnisse der Datenvorverarbeitung zum Zweck des ortsgleichen Bezugs der Sensordaten jeweils in einer Speichereinheit gespeichert werden,
- dadurch gekennzeichnet,**
  - daß die gespeicherten Daten als Eingangsgrößen mindestens einem trainierbaren, künstlichen neuronalen Netz mit einer im wesentlichen hierarchischen Netzstruktur zugeführt werden,
  - daß das mindestens eine trainierbare, künstliche neuronale Netz mit im wesentlichen hierarchischer Netzstruktur aus mindestens zwei im wesentlichen unabhängigen, trainierbaren, künstlichen neuronalen Teilnetzen gebildet wird,
  - daß das erste künstliche neuronale Teilnetz aus mindestens zwei unabhängigen, künstlichen neuronalen Teilnetzen gebildet wird,
  - daß den ersten künstlichen neuronalen Teilnetzen jeweils die Ergebnisse der Datenvorverarbeitung

tungen als Eingangsgrößen zugeführt werden,  
 - daß dem zweiten künstlichen neuronalen Teilnetz die Ergebnisse der ersten künstlichen neuronalen Teilnetze als Eingangsgrößen zugeführt werden, und  
 - daß das Ergebnis des mindestens einen künstlichen neuronalen Netzes zur Qualitätskontrolle genutzt wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß ein Sensor für die Erfassung der Spaltgeometrie verwendet wird, bei welchem der Sensor vor dem Schweißort angeordnet wird.
3. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 2, dadurch gekennzeichnet, daß ein Sensor für die Erfassung des Fügspaltes verwendet wird, bei welchem der Sensor vor dem Schweißort angeordnet wird.
4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, daß ein Sensor für die Erfassung der Pyrotemperatur verwendet wird, bei welchem der Sensor kurz hinter dem Schweißort angeordnet wird.
5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß jedes erste künstliche neuronale Teilnetz aus drei Schichten gebildet wird, bei welchem die erste Schicht aus genau einem Neuron gebildet wird, die zweite Schicht aus einer Vielzahl von Neuronen gebildet wird und die dritte Schicht aus genau einem Neuron gebildet wird.
6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, daß das zweite künstliche neuronale Teilnetz aus drei Schichten gebildet wird, bei welchem die erste Schicht aus einer Vielzahl von Neuronen gebildet wird, die zweite Schicht aus einer Vielzahl von Neuronen gebildet wird und die dritte Schicht aus genau einem Neuron gebildet wird.
7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, daß der Lernprozeß des künstlichen neuronalen Netzes mit Hilfe eines Backpropagation Lernalgorithmus durchgeführt wird, bei welchem die ersten künstlichen neuronalen Teilnetze bei einer Lernrate  $\eta$  zwischen 0,01 und 0,1 und einem Momentum  $\alpha$  zwischen 0,1 und 0,6 justiert werden und bei welchem das zweite künstliche neuronale Teilnetz bei einer Lernrate  $\eta$  und einem Momentum  $\alpha$ , die im wesentlichen dem Gradientenverlauf einer Fehlerfunktion des Ausgangs des künstlichen neuronalen Teilnetzes angepaßt werden, justiert wird.
8. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, daß bei der Datenvorverarbeitung eine Merkmalsextraktion der Sensordaten durchgeführt wird.
9. Verfahren nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, daß bei der Merkmalsextraktion der die Spaltbreite charakterisierenden Sensordaten die von einem am Schweißort angeordneten Sensor gemessenen Sensordaten jeweils als Eingangsgröße einer Fehlerunterdrückung zugeführt werden, die Ergebnisse der Fehlerunterdrückung jeweils als Eingangsgröße einer im wesentlichen frei definierbaren Fenstermittlung zugeführt werden und die Differenz der Ergebnisse der Fenstermittlungen gebildet wird.
10. Verfahren nach einem der Ansprüche 8 oder 9, dadurch gekennzeichnet, daß bei der Merkmalsextraktion der die Plasmaintensität charakterisierenden Sensordaten die von einem Plasmaintensitätssensor gemessenen Sensordaten als Eingangsgröße einer Fenstertransformation zugeführt werden.
11. Verfahren nach einem der Ansprüche 8 bis 10, da-

durch gekennzeichnet, daß bei der Merkmalsextraktion der den Nahteinfall charakterisierenden Sensordaten die von einem Geometriesensor gemessenen Sensordaten als Eingangsgröße einer Fenstermittlung zugeführt werden.

12. Verfahren nach einem der Ansprüche 8 bis 11, dadurch gekennzeichnet, daß bei der Merkmalsextraktion der den Kantenversatz charakterisierenden Sensordaten die von einem Geometriesensor gemessenen Sensordaten als Eingangsgröße einer Mittelwertstransformation zugeführt werden und das Ergebnis der Mittelwertstransformation einer Fenstermittlung zugeführt wird.

13. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 12, dadurch gekennzeichnet, daß die Ergebnisse der ersten künstlichen neuronalen Teilnetze jeweils wertbereichsnormiert sind und diese wertbereichsnormierten Ergebnisse dem zweiten künstlichen neuronalen Teilnetz zugeführt werden.

14. Vorrichtung, insbesondere zur Verwirklichung eines Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 13, mit

- mindestens zwei Sensoren zur Erfassung von Sensordaten, die um den Schweißort angeordnet sind,

- wobei ein das Schweißplasma erfassender Sensor am Schweißort angebracht ist, und

- wobei ein die Nahtgeometrie erfassender Sensor nach dem Schweißort angebracht ist, und

- wobei die Sensordaten jeweils einer Datenvorverarbeitung als Eingangsgröße dienen,

- wobei Speichereinheiten, die die Ergebnisse der Datenvorverarbeitung zum Zweck des ortsgleichen Bezugs der Sensordaten abspeichern,

dadurch gekennzeichnet,

- daß die Einträge der Speichereinheiten als parallele Eingangsgrößen einer im wesentlichen trainierbaren, künstlichen neuronalen Netzstruktur dienen,

- daß das mindestens eine trainierbare, künstliche neuronale Netz mit im wesentlichen hierarchischer Netzstruktur mindestens zwei im wesentlichen unabhängige, künstliche neuronale Teilnetze aufweist,

- daß das erste künstliche neuronale Teilnetz mindestens zwei unabhängige, künstliche neuronale Teilnetze aufweist,

- daß die ersten künstlichen neuronalen Teilnetze jeweils die Ergebnisse der Datenvorverarbeitungen als Eingangsgrößen verarbeiten,

- daß die zweiten künstlichen neuronalen Teilnetze die Ergebnisse der ersten künstlichen neuronalen Teilnetze als Eingangsgrößen verarbeiten, und

- daß das Ergebnis der neuronalen Netzstruktur der qualitativen Beurteilung der Schweißnaht dient.

15. Vorrichtung nach Anspruch 14, dadurch gekennzeichnet, daß ein Geometriesensor im wesentlichen vor dem Schweißort angeordnet ist.

16. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 14 oder 15, dadurch gekennzeichnet, daß ein Pyrosensor am Schweißort angeordnet ist.

17. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 14 bis 16, dadurch gekennzeichnet, daß ein Spaltsensor vor dem Schweißort angeordnet ist.

- Leerseite -



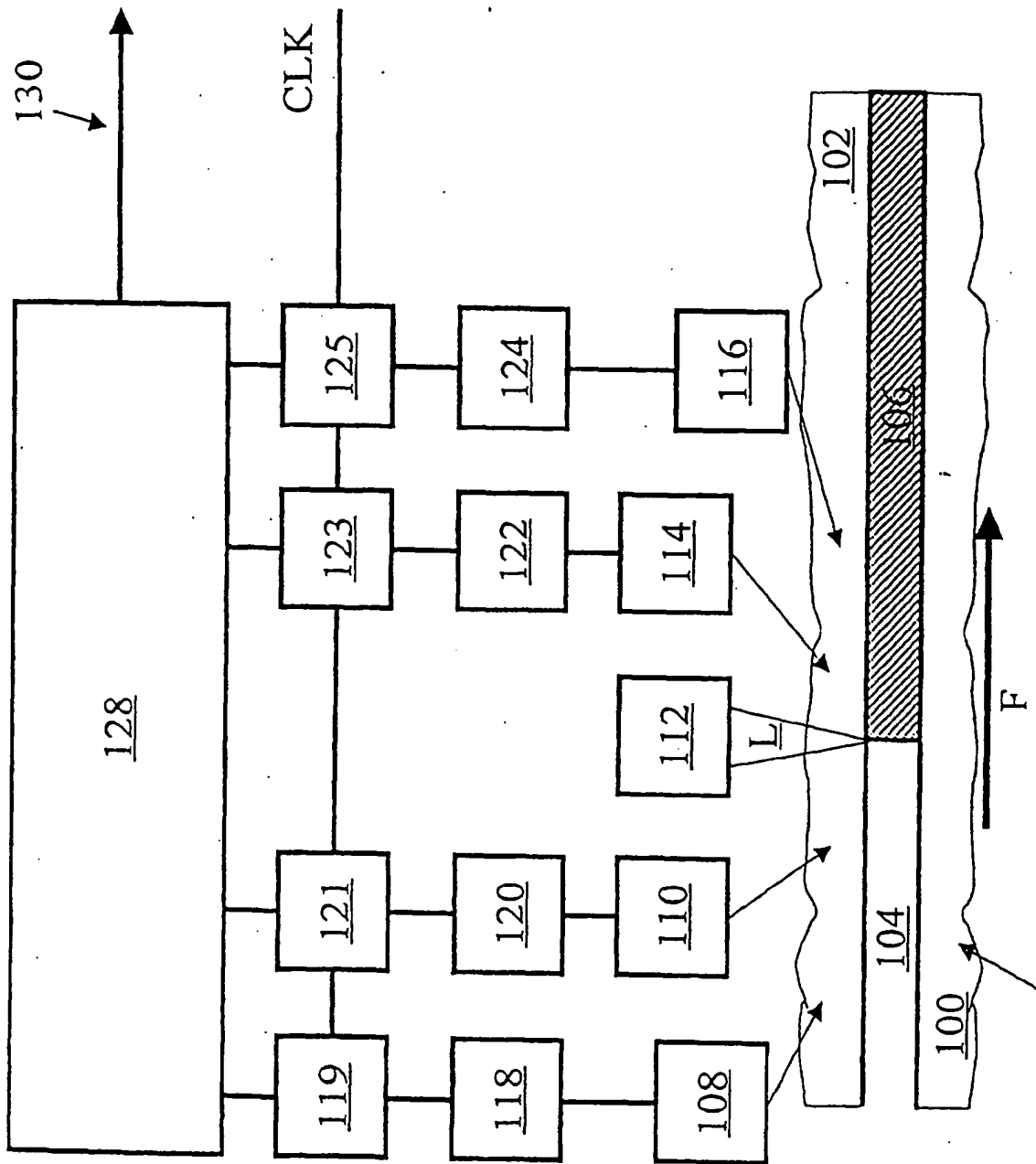


Fig. 1

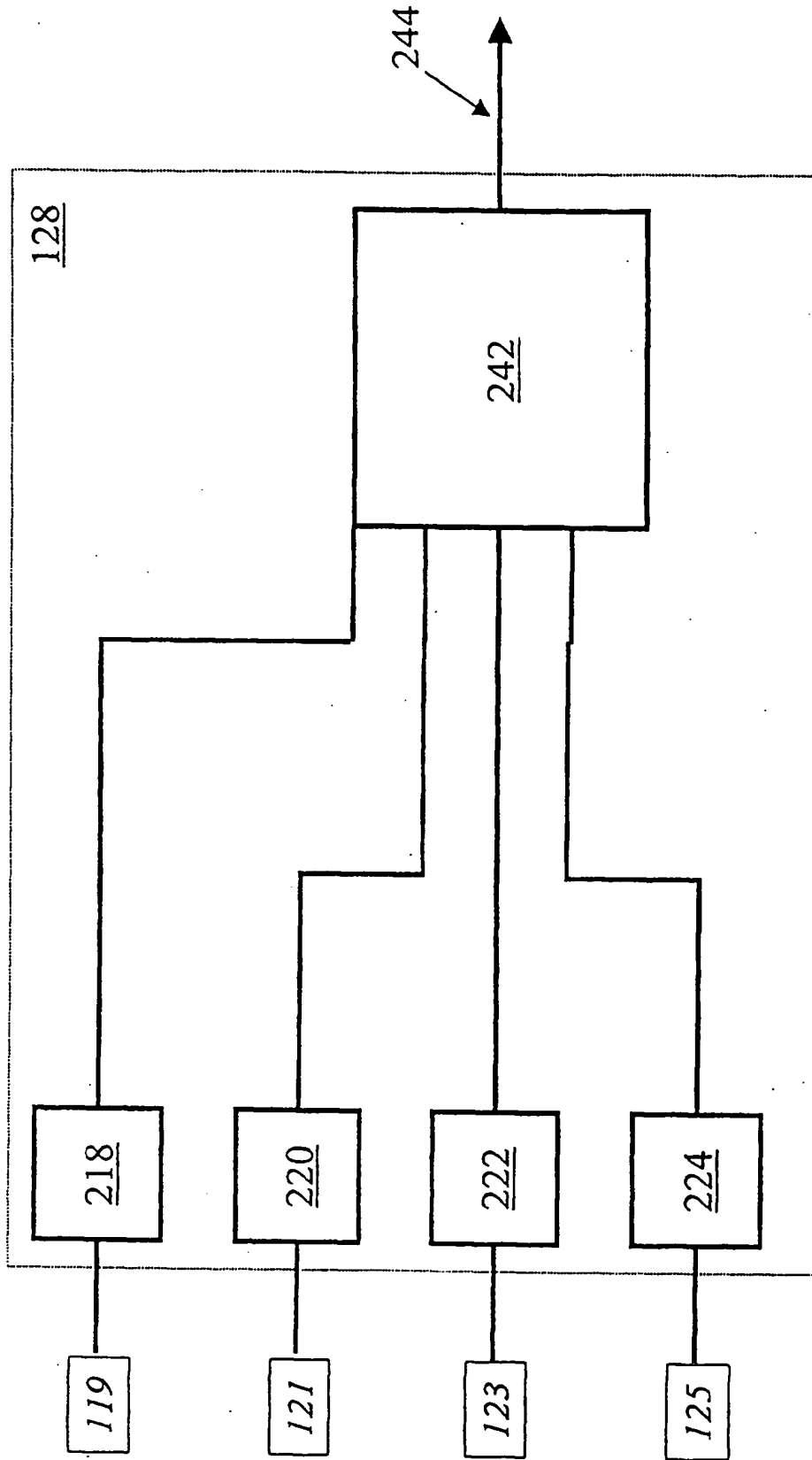


Fig. 2

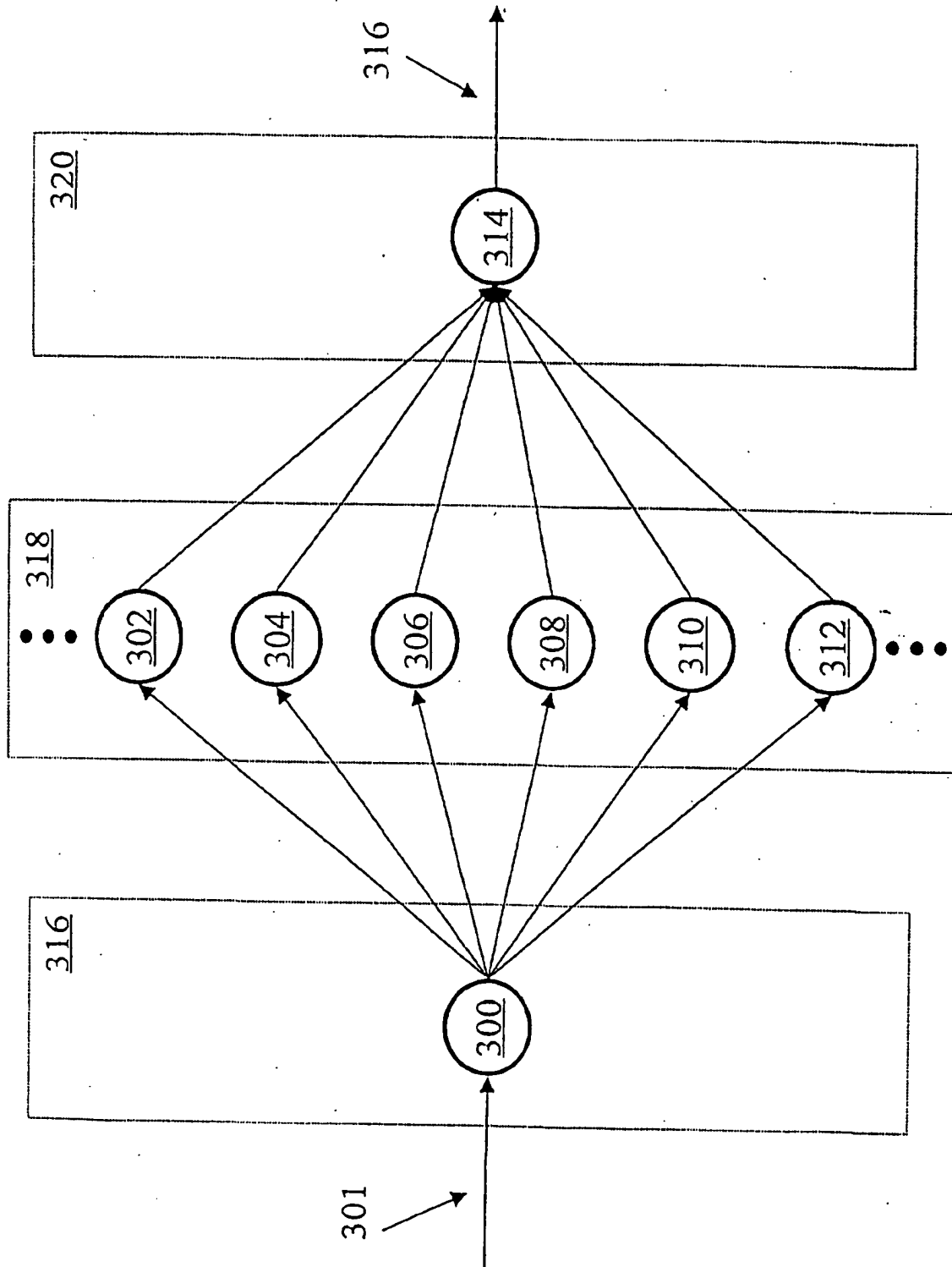


Fig. 3

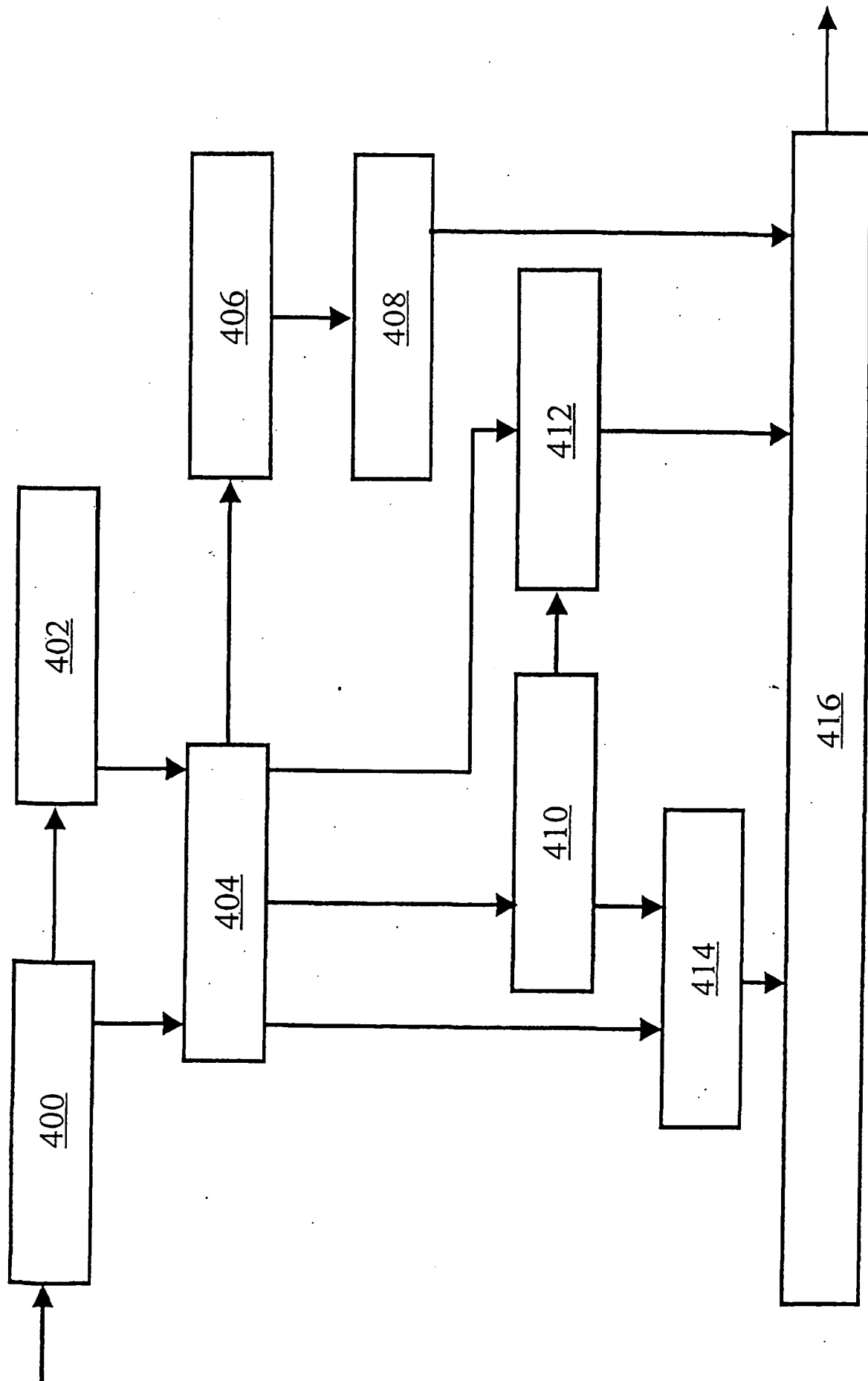


Fig. 4

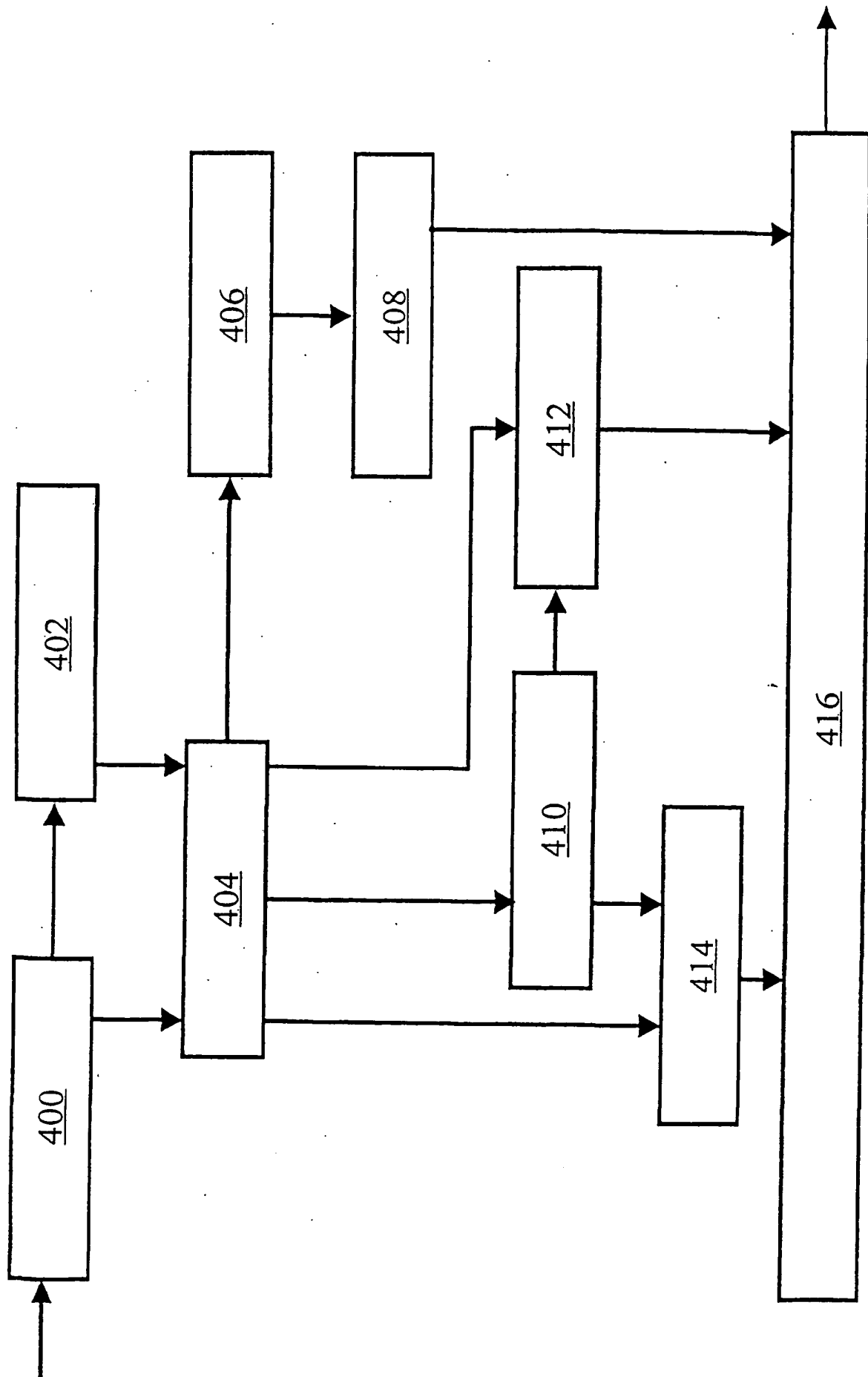


Fig. 4

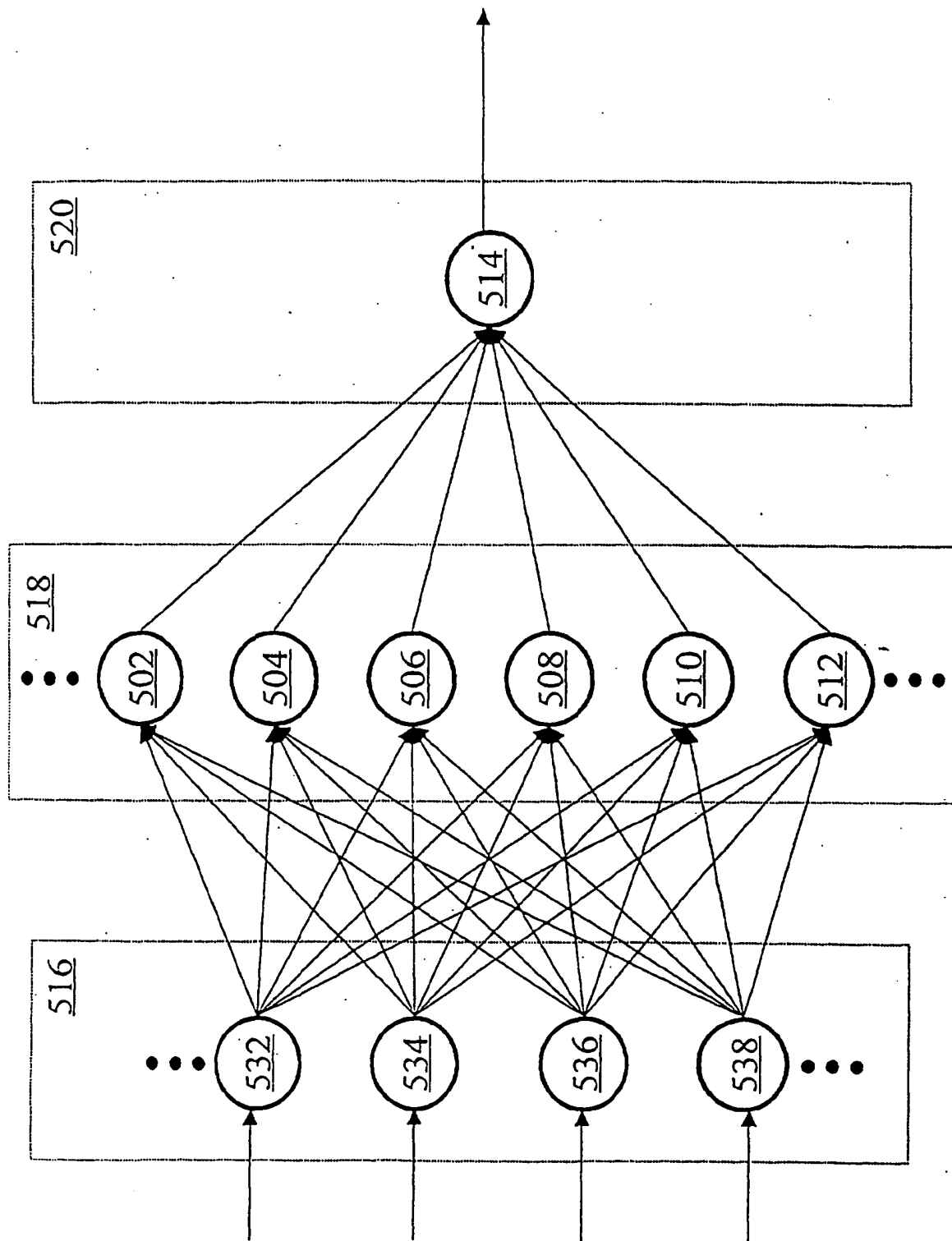


Fig. 5

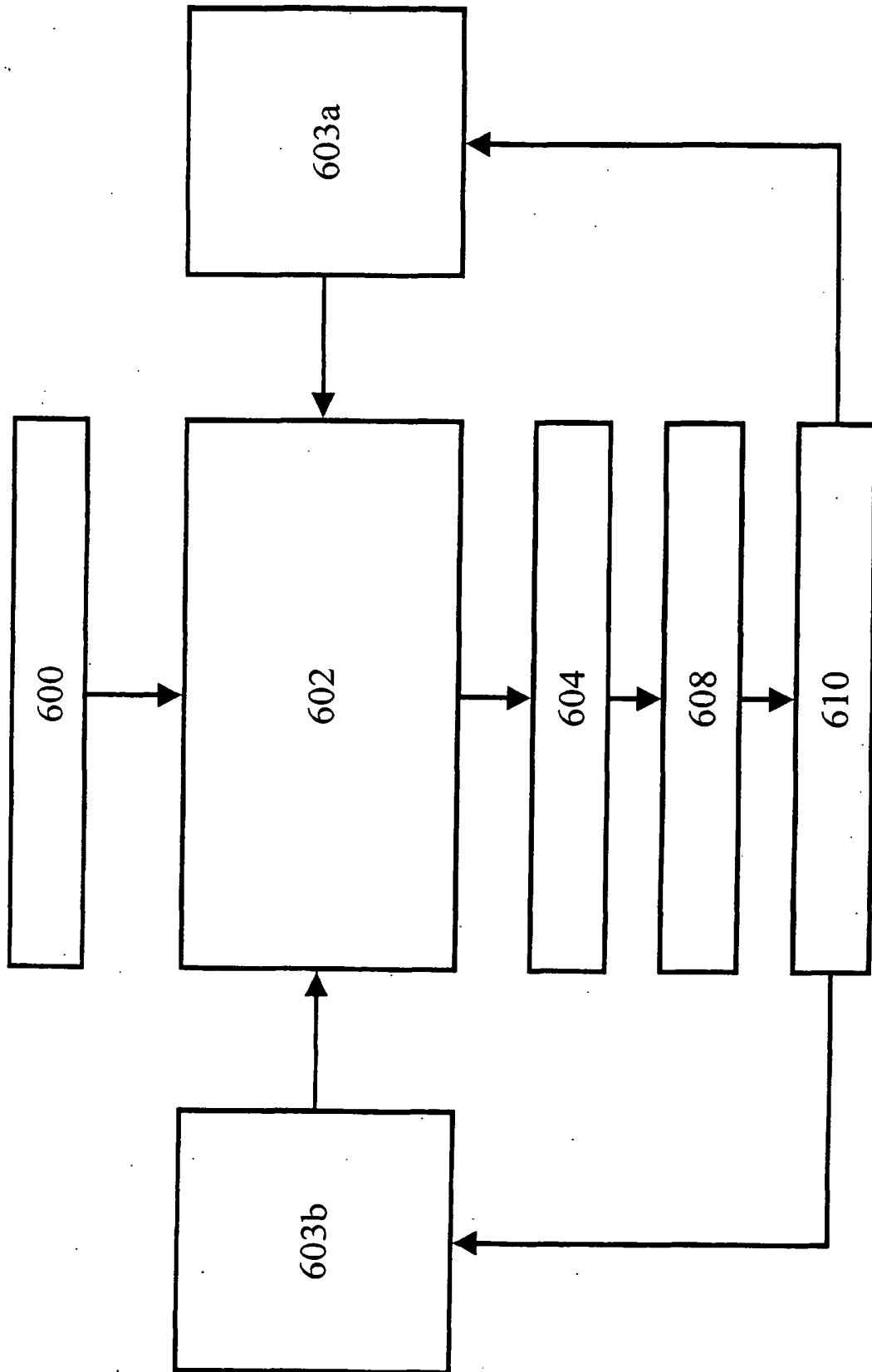


Fig. 6